



DOI 10.58423/2786-6742/2026-14-73-86

УДК 330.4:004:37:330.35(4)

Костянтин ГРИЦЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри економічної кібернетики,
Сумський державний університет,
м. Суми, Україна

ORCID ID: [0000-0002-7855-691X](https://orcid.org/0000-0002-7855-691X)

Scopus Author ID: [58917505000](https://orcid.org/58917505000)

Олександр ОСТРОВСЬКИЙ

аспірант,
Сумський державний університет,
м. Суми, Україна

ORCID ID: [0009-0008-1677-6002](https://orcid.org/0009-0008-1677-6002)

e-mail: olexander.ostrovsky@gmail.com

(Corresponding author)

ВПЛИВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ СУСПІЛЬСТВА ТА ОСВІТИ НА ЕКОНОМІЧНІ ТРАНСФОРМАЦІЇ І БЕЗПЕКУ: ВИБІР ПАНЕЛЬНОЇ СПЕЦИФІКАЦІЇ

Анотація. У дослідженні розроблено відтворюваний науково-методичний підхід до ідентифікації впливу цифровізації суспільства і освіти на економічні трансформації та цифрову безпеку країн Європи. Дослідження базується на панельних вхідних даних: 20 показників для 20 країн Європи за період 2010-2024рр. Це дає змогу поєднати міжкраїновий та міжчасовий виміри аналізу і зменшити вплив випадкових чинників на формулювання висновків. Інформаційною базою дослідження є відкриті міжнародні статистичні джерела. Використовуючи первинні індикатори з відкритих джерел сформовано чотири домени: Society, Education, Economy, Security. Первинні індикатори гармонізовано за напрямом впливу (стимулятори/дестимулятори), потім нормалізовано та агреговано ентропійним методом в інтегральні індекси, придатні для подальшого аналізу. Мета дослідження полягає у формалізації протоколу обґрунтування специфікації моделі панельної регресії, який забезпечує коректне оцінювання параметрів за наявності невимірюваної міжкраїнової гетерогенності, часових шоків і можливої залежності похибок. Методологія проведення дослідження включає порівняльний аналіз об'єднаної МНК-моделі (pooled OLS) та моделей панельної регресії з фіксованими (FE) та випадковими (RE) ефектами, а також застосування діагностичних тестів (F-тест для pooled OLS та FE, LM Breusch-Pagan, Hausman, one-way FE та two-way FE тести). Для інференції використано кластерно-робастні стандартні похибки за країнами. Додаткову перевірку стійкості виконано за підходом Driscoll-Kraay. Отримані результати показують, що припущення щодо доцільності використання в рівняннях як економічних трансформацій так і цифрової безпеки таких специфікацій моделі панельної регресії, як pooled OLS та RE, відхиляються, а коректною специфікацією моделі панельної регресії є FE. Для рівняння економічних трансформацій коректною є специфікація моделі панельної регресії з



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

двосторонніми фіксованими ефектами (країна + рік), в той час як для рівняння цифрової безпеки достатньо використовувати специфікацію моделі панельної регресії з фіксованими ефектами країн з подальшою перевіркою чутливості. Регресійні коефіцієнти при доменному індексі цифровізації суспільства мають позитивний вплив і статистичну значущість у різних схемах робастної інференції. У випадку домена цифровізації освіти (Education) виявлено слабший короткостроковий ефект, проте лагова перевірка дала додатні й статистично значущі оцінки параметрів у рівняннях як економічних трансформацій так і цифрової безпеки, що узгоджується з гіпотезою відкладеного впливу розвитку людського капіталу на економічні трансформації та цифрову безпеку. Впливи ефектів взаємодії залежать від результуючого домену (Economy або Security), тому їх коректно трактувати як контекстно-специфічні, а не як загальний ефект компліментарності. Науковий результат дослідження полягає у формуванні відтворюваного прикладного фреймворку для одночасного аналізу на макрорівні впливу підсистем цифровізації суспільства (Society) та освіти (Education) на результуючі домени: економічні трансформації (Economy) та цифрову безпеку (Security). Практична цінність отриманих результатів дослідження полягає у переході від описового ранжування країн Європи до обґрунтованого визначення політичних пріоритетів цифрового розвитку країн Європи з урахуванням того, що канал цифровізації суспільства демонструє стабільніший короткостроковий ефект, в той час як канал цифровізації освіти проявляється більшою мірою через лагові механізми. Таким чином стає очевидно, що різні підсистеми цифровізації вимагають різних горизонтів планування політики цифрового розвитку країн Європи.

Ключові слова: цифровізація освіти, цифровізація суспільства, економічні трансформації, цифрова безпека, специфікація моделі панельної регресії, фіксовані ефекти, випадкові ефекти.

JEL Classification: C23, C51, O33, I25, O11

Absztrakt. A kutatás reprodukálható tudományos-módszertani megközelítést dolgozott ki a társadalom és az oktatás digitalizációjának az európai országok gazdasági transzformációjára és digitális biztonságára gyakorolt hatásának azonosítására. A kutatás paneladatokon alapul: 20 mutató 20 európai országra vonatkozóan a 2010–2024 közötti időszakban. Ez lehetővé teszi az országok közötti és az időbeli elemzési dimenziók összekapcsolását, valamint a véletlenszerű tényezők következtetések megfogalmazására gyakorolt hatásának mérséklését. A kutatás információs bázisát nyílt hozzáférésű nemzetközi statisztikai források képezik. A nyílt forrásokból származó elsődleges indikátorok felhasználásával négy domén került kialakításra: Society, Education, Economy és Security. Az elsődleges indikátorokat hatásirányuk szerint (stimulátorok/desztimulátorok) harmonizálták, majd normalizálták, és entrópia-módszerrel a további elemzésre alkalmas integrált indexekké aggregálták.

A kutatás célja a panelregressziós modell specifikációjának megalapozására szolgáló protokoll formalizálása, amely biztosítja a paraméterek korrekt becslését nem megfigyelhető országok közötti heterogenitás, időbeli sokkok és a hibatagok közötti lehetséges függőség fennállása esetén. A kutatás módszertana magában foglalja az összevont legkisebb négyzetek módszerével becsült modell (pooled OLS), valamint a fix (FE) és véletlen (RE) hatású panelregressziós modellek összehasonlító elemzését, továbbá diagnosztikai tesztek alkalmazását (F-teszt a pooled OLS és FE modellek összehasonlítására, Breusch–Pagan LM-teszt, Hausman-teszt, one-way FE és two-way FE tesztek). A statisztikai következtetéshez országok szerint klaszterezett robusztus standard hibák kerültek alkalmazásra. A robusztusság további ellenőrzése a Driscoll–Kraay-megközelítés alkalmazásával történt. A kapott eredmények azt mutatják, hogy mind a gazdasági transzformáció, mind a digitális biztonság egyenleteiben elvethetők azok a feltételezések, amelyek szerint indokolt lenne a pooled OLS és RE panelregressziós modellspecifikációk alkalmazása; a megfelelő panelregressziós modellspecifikáció az FE-modell. A gazdasági transzformáció egyenlete esetében a kétirányú fix hatásokat (ország + év) tartalmazó panelregressziós modellspecifikáció bizonyult megfelelőnek, míg a digitális biztonság



egyenletében elegendő az ország szerinti fix hatásokat tartalmazó panelregressziós modellspecifikáció alkalmazása, ezt követő érzékenységvizsgálattal. A társadalom digitalizációját mérő doménindex regressziós együtthatói pozitív hatást és statisztikai szignifikanciát mutatnak a robusztus statisztikai következtetés különböző eljárásai mellett. Az oktatás digitalizációjának (Education) doménje esetében gyengébb rövid távú hatás került kimutatásra, ugyanakkor a késleltetett hatások vizsgálata pozitív és statisztikailag szignifikáns paraméterbecsléseket eredményezett mind a gazdasági transzformáció, mind a digitális biztonság egyenleteiben, ami összhangban áll azzal a hipotézissel, hogy a humán tőke fejlődése késleltetett hatást gyakorol a gazdasági transzformációra és a digitális biztonságra. Az interakciós hatások a vizsgált eredménydoméntől (Economy vagy Security) függően eltérnek, ezért helyesebb azokat kontextusspecifikus hatásokként, nem pedig a komplementaritás általános hatásaként értelmezni. A kutatás tudományos eredménye egy olyan reprodukálható alkalmazott keretrendszer kialakítása, amely lehetővé teszi a társadalom (Society) és az oktatás (Education) digitalizációs alrendszerei által az eredménydoménre, a gazdasági transzformációra (Economy) és a digitális biztonságra (Security), gyakorolt hatások egyidejű, makroszintű elemzését. A kutatási eredmények gyakorlati értéke abban áll, hogy lehetővé teszik az európai országok leíró rangsorolásától való elmozdulást az európai országok digitális fejlődésére vonatkozó szakpolitikai prioritások megalapozott meghatározása felé, figyelembe véve, hogy a társadalom digitalizációjának csatornája stabilabb rövid távú hatást mutat, míg az oktatás digitalizációjának csatornája nagyobb mértékben késleltetett mechanizmusokon keresztül érvényesül. Ennek megfelelően nyilvánvalóvá válik, hogy a digitalizáció különböző alrendszerei eltérő tervezési időhorizontokat igényelnek az európai országok digitális fejlesztési politikájában.

Kulcsszavak: az oktatás digitalizálása, a társadalom digitalizálása, gazdasági átalakulások, digitális biztonság, panelregressziós modell specifikációja, fix hatások, véletlenszerű hatások.

Abstract. This paper develops and empirically validates a reproducible methodological framework for identifying the effects of societal and educational digitalization on economic transformations and digital security across European countries. The study is based on panel data: 20 indicators for 20 countries over the period 2010-2024, which allows for combining cross-country and time-series dimensions of analysis and reducing the influence of random factors when drawing conclusions. The dataset is compiled from open international statistical sources and transformed into four coherent domains: Society, Education, Economy, and Security. The primary indicators are harmonized by impact direction (benefit-type and cost-type indicators), normalized, and aggregated into composite indices suitable for further analysis. The study objective is to formalize a model-selection protocol that provides statistically consistent parameter estimates under unobserved country heterogeneity, common time shocks, and potentially dependent error structures. The methodology combines a comparison of pooled OLS, fixed-effects (FE) and random-effects (RE) models, as well as a system of empirical application of diagnostic tests (pooled vs FE F-test, Breusch-Pagan LM, Hausman, one-way vs two-way FE tests). Cluster-robust standard errors by country were used for inference. An additional stability check was performed using the Driscoll-Kraay approach. The findings indicate that RE assumptions are rejected for both outcome equations, implying FE as the consistent baseline. For the economic-transformation equation, two-way fixed effects (country + year) are statistically required. For the security equation, country fixed effects are sufficient as the baseline with additional time-effect robustness checks. The coefficients for society's digitalization domain index is consistently positive and remains significant across alternative inference schemes. For the digitalization of education, a weaker short-term effect was found; however, the lag test yields positive and statistically significant estimates in both equations, which is consistent with the hypothesis of the delayed impact of human capital development. Interaction effects show that they do not have a universal sign and depend on the resulting domain; accordingly, they should be correctly interpreted as context-specific rather than as a general effect of complementarity. The study's contribution lies in a reproducible research design that integrates established panel-econometric tools for a combined

assessment of Society and Education digitalization effects on both Economy and Security outcomes in a European macro-panel. Its practical value lies in the shift from a descriptive ranking of countries to a parametrically grounded identification of policy priorities, considering that the societal channel of digitalization demonstrates a more stable short-term effect, while the educational channel operates mainly through dynamic (lagged) mechanisms. Thus, it becomes evident that different subsystems require different policy planning horizons.

Keywords: digitalization of education, digitalization of society, economic transformations, digital security, panel specifications, fixed effects, random effects.

Постановка проблеми. Темпи розвитку цифрових компетентностей, цифрової інфраструктури суспільства, цифровізації економічних процесів та безпекових компонентів можуть істотно відрізнятись як між різними країнами, так і всередині однієї країни. Причиною цього є те, що цифрова трансформація, зокрема європейських країн, відбувається нерівномірно як у міжкраїновому, так і в міждомених вимірах. Такі умови спричиняють необхідність мати чітке розуміння того, які канали діджиталізації та як саме впливають одне на одного та які з них можна вважати факторними, а які – результативними. Це є важливим для формування цільових політик на рівні держав, які не можуть спиратись лише на агреговані рейтинги, що не відповідають на ключове питання причинності.

Наукова проблема полягає у коректному визначенні впливу діджиталізації суспільства та освіти на економічні трансформації та цифрову безпеку при наявності невимірюваної міжкраїнової гетерогенності, спільних часових шоків та потенційної залежності похибок. У випадку з макропанелями це означає необхідність не лише якісного оцінювання параметрів моделі панельної регресії, а й обґрунтування вибору її специфікації, оскільки помилка на даному етапі може призвести до системного викривлення висновків при формуванні політик цифрового розвитку країн.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження цифрових трансформацій є методично неоднорідними, оскільки існують як інституційні аналітичні огляди, макроекономічні та порівняльні міжкраїнові дослідження, так і ґрунтовні спеціалізовані праці з панельної методології. У масиві наявних публікацій можна виділити декілька логічних груп зі своїми сильними та слабкими сторонами.

Перша група публікацій об'єднує міжнародні інституційні огляди та статистичні індекси [1, 2]. Її сильні сторони – це стабільна прозора методологія збору даних, висока порівнянність показників і придатність для моніторингу змін. Слабкою стороною є те, що хоча ці публікації і надають методологічну рамку для ранжування та описової аналітики різних країн, проте в них не вирішується питання структурної ідентифікації параметрів у моделях панельної регресії.

Друга група публікацій містить наукові результати дослідження цифровізації, продуктивності та резильєнтності на мікро- та мезорівнях [3, 4, 5]. Її сильною стороною є використання мікроекономічних специфікацій моделей



панельної регресії з великою увагою до ідентифікаційних припущень, що підсилює доказовість висновків про вплив інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Слабкою стороною є те, що значна частина отриманих наукових результатів стосується окремих секторів функціонування країни, або конкретних підприємств, тому не можна безпосередньо перенести отримані результати на макрорівень, необхідна додаткова методична адаптація.

Третя група публікацій – це порівняльні дослідження впливу діджиталізації в країнах Європейського Союзу. Її сильні сторони – це сфокусованість на європейському контексті, придатність для формування політики цифрового розвитку в рамках регіону, міжкраїнова інтерпретованість [6, 7, 8]. В той же час у частині таких публікацій або домінує агрегований підхід без формального протоколу вибору специфікації моделі, або роль невимірюваної міжкраїнової гетерогенності та часових шоків недостатньо врахована при формуванні кінцевих висновків.

Остання група публікацій, яка має відношення до теми даного дослідження, – це ґрунтовні методологічні праці з панельної економетрики та суміжних методологій оцінювання складних міжкраїнових взаємозв'язків [9, 10]. Їхньою безперечною перевагою є використання строгого економетричного інструментарію для вибору специфікації моделі панельної регресії, перевірки робастної інференції та коректне трактування отриманих результатів у часових панелях. У даному випадку не доводиться казати про методологічну слабкість, а радше про часткове використання наявних методичних можливостей, часто такі публікації створюються для демонстрації життєздатності та ключових можливостей пропонованої методології, а не для формування практичних висновків.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз вищезазначених публікацій дозволяє зробити висновок, що питання інтеграції доменного підходу [Society, Education] → [Economy, Security] з відтворюваним протоколом вибору специфікації моделі панельної регресії для одночасного оцінювання економічних трансформацій та цифрової безпеки у макропанелях країн Європи, потребує подальшого дослідження. Також в існуючих публікаціях недостатньо уваги приділено питанню інтерпретації впливу суспільного та освітнього каналів діджиталізації за різних схем робастної інференції та часової структури моделі панельної регресії. Дане дослідження спрямоване на вирішення цих питань.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка та емпірична верифікація відтворюваного протоколу вибору специфікації моделі панельної регресії, яка дає можливість коректного оцінювання впливу цифровізації суспільства та освіти на зміни в цифровій безпеці та економічних трансформаціях країн Європи. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

1. Формування порівнюваних доменних інтегральних індексів S, E, Eco, Sec на гармонізованих панельних вхідних даних за 2010-2024 рр. для 20 країн Європи.

2. Оцінювання параметрів системи рівнянь для двох результативних доменів Eco, Sec у альтернативних специфікаціях моделі панельної регресії: pooled OLS, RE, FE.

3. Реалізація послідовного тестового протоколу вибору специфікації моделі панельної регресії та формулювання висновку для кожного рівняння.

4. Перевірка стійкості висновків до альтернативної робастної інференції та уточнення прикладних наслідків для політики цифрового розвитку.

Методи та методологія. Методологічна основа дослідження базується на поєднанні методу інтегральних індексів, та методів і моделей панельної економетрики. Першим етапом є гармонізація показників за напрямом впливу, нормалізація та агрегація за чотирма доменами в інтегральні індекси, це забезпечує порівнюваність між країнами та роками. Підготовка даних зменшує розмірність інформаційної бази та переводить значення відібраних індикаторів в єдину аналітичну шкалу.

Другим етапом дослідження є використання методології панельної економетрики, яка надає змогу одночасно враховувати як міжкрайові відмінності, так і часову динаміку індикаторів. Вибір між pooled OLS, fixed та random effects здійснюється через послідовність діагностичних тестів: F-тест, LM-тест Breusch-Pagan, тест Хаусмана, перевірка потреби у часових ефектах. Для підвищення надійності інференції застосовано кластерно-робастні стандартні похибки за країнами та додано перевірку Driscoll-Kraay, яка дозволяє оцінити стійкість висновків до потенційної міжкрайової залежності й часової автокореляції похибок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вхідні дані для формування панелі було взято з відкритих міжнародних статистичних баз даних World Bank DataBank [11] та Eurostat [12]. Збалансована панель складається з 20 показників для 20 європейських країн (Австрія, Бельгія, Болгарія, Боснія та Герцеговина, Чехія, Естонія, Фінляндія, Франція, Німеччина, Угорщина, Литва, Нідерланди, Північна Македонія, Польща, Румунія, Словенія, Іспанія, Швеція, Туреччина, Україна), серед яких є як розвинуті, так і такі, що розвиваються, за 2010-2024 рр. Показники згруповані за 4 доменами.

Society (S): відсоток Інтернет-користувачів; кількість підписок на стільниковий зв'язок; кількість підписок на широкосмуговий доступ до Інтернету; індекс розвитку електронного урядування; відсоток осіб які використовують Інтернет для взаємодії з державними органами.

Education (E): відсоток осіб, які вміють писати комп'ютерні програми; відсоток осіб, які брали участь в онлайн-навчанні; відсоток випускників вищої освіти у сфері ІКТ; частка підприємств з можливістю підвищення ІКТ-навичок персоналу; рівень цифрових навичок громадян.

Economy (Eco): відсоток експорту ІКТ-послуг; відсоток секторів з високою цифровою інтенсивністю у загальній зайнятості; відсоток ІКТ-сектору у ВВП; відсоток підприємств з продажами через електронну комерцію; відсоток осіб, які роблять покупки в Інтернеті.

Security (Sec): відсоток підприємств, на яких було визначено або переглянуто політику безпеки ІКТ протягом року; відсоток підприємств, які зазнали будь-яких інцидентів, пов'язаних із безпекою ІКТ; частка осіб, які мають навички керування доступом до своїх персональних даних в Інтернеті; відсоток громадян, яким проблеми безпеки заважали здійснювати базові онлайн-активності; частка осіб, які мають навички валідації цифрового контенту.

На підготовчому етапі виконано гармонізацію вхідних даних з урахуванням напрямку впливу (стимулятори/дестимулятори), min-max нормалізацію, контроль збалансованості панелі, відсутність пропусків та аномалій. Первинні індикатори агреговано в 4 домени S_{it} , E_{it} , Eco_{it} , Sec_{it} та сформовано доменні інтегральні індекси на основі ентропійної згортки. Ентропійний метод згортки був обраний через його керований даними характер, коли ваги обираються не суб'єктивно, а відповідно до інформаційної варіативності показника у вибірці, що підвищує відтворюваність індексів:

$$I_{d,it} = \sum_{j=1}^{m_d} \omega_{dj} x_{dj,it} , \quad \sum_{j \in d} \omega_{dj} = 1 , \quad (1)$$

де: $I_{d,it}$ – інтегральний індекс домену d для країни i у період t ;

m_d – кількість індикаторів у домені d ;

$x_{dj,it}$ – нормалізоване значення j -го індикатора домену d ;

ω_{dj} – ентропійна вага відповідного j -го індикатора в межах домену d .

Далі було визначено базові рівняння впливу факторних інтегральних індексів на результуючі:

$$Eco_{it} = \beta_0 + \beta_1 S_{it} + \beta_2 E_{it} + \mu_i + \lambda_t + u_{it} , \quad (2)$$

$$Sec_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 S_{it} + \gamma_2 E_{it} + \mu_i + \lambda_t + u_{it} , \quad (3)$$

де: Eco_{it} – індекс економічної трансформації країни i у період t ;

Sec_{it} – індекс цифрової безпеки країни i у період t ;

S_{it} – індекс цифровізації суспільства країни i у період t ;

E_{it} – індекс цифровізації освіти країни i у період t ;

μ_i – незмінний у часі країновий ефект;

λ_t – спільний часовий ефект;

u_{it} – ідіосинкратична випадкова похибка.

Емпіричний етап оцінювання включає в себе послідовне порівняння специфікацій pooled OLS, RE та FE із обов'язковим вибором фінальної специфікації моделі панельної регресії базуючись на результатах діагностичних тестів для кожної специфікації. Інференція здійснена з використанням робастних стандартних похибок із кластеризацією за країнами.

Спочатку було застосовано діагностичний F-тест pooled OLS vs FE, який показує, чи можна ігнорувати незмінну міжкраїнну гетерогенність.

Потім було проведено діагностичний LM-тест Breusch-Pagan, щоб перевірити наявність панельної випадкової компоненти відносно pooled OLS:

$$LM = \frac{NT}{2(T-1)} \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\sum_{t=1}^T \hat{e}_{it})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \hat{e}_{it}^2} - 1 \right]^2 \sim \chi^2(1), \quad (4)$$

де: N – кількість країн;

T – кількість часових періодів;

$\hat{e}_{it}$ – залишки pooled OLS для країни i у період t ;

$\chi^2(1)$ – граничний розподіл статистики з одним ступенем свободи.

Після підтвердження панельної структури було застосовано діагностичний тест Хаусмана, що дає змогу обрати між специфікаціями RE та FE і виявити чи можна вважати індивідуальні ефекти некорельованими з регресорами:

$$H = (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE})' [Var(\hat{\beta}_{FE}) - Var(\hat{\beta}_{RE})]^{-1} (\hat{\beta}_{FE} - \hat{\beta}_{RE}) \sim \chi^2(k), \quad (5)$$

де: $\hat{\beta}_{FE}$ – вектор оцінених коефіцієнтів у специфікації FE;

$\hat{\beta}_{RE}$ – вектор оцінених коефіцієнтів у специфікації RE;

$Var(\hat{\beta}_{FE})$ та $Var(\hat{\beta}_{RE})$ – відповідні оцінки матриць коваріацій векторів $\hat{\beta}_{FE}$ і $\hat{\beta}_{RE}$;

k – кількість порівнюваних коефіцієнтів;

$\chi^2(k)$ – асимптотичний розподіл статистики Хаусмана з k ступенями свободи.

Після вибору специфікації FE фінальний крок полягає у перевірці чи додають часові ефекти статистично значущу інформацію у порівнянні з країновими ефектами. Для цього було використано діагностичний F-тест one-way FE vs two-way FE.

Статистики діагностичних тестів наведено в таблиці 1.

За даними діагностичних тестів, можна зробити висновки, що специфікація pooled OLS є неприйнятною для жодного з рівнянь, оскільки F- та LM-тести статистично відхиляють відповідні нульові гіпотези. Тест Хаусмана для обох рівнянь відхиляє припущення про специфікацію RE на користь специфікації FE.



Тому базою для параметризації обрана специфікація FE. Для рівняння економічних трансформацій (Eco_{it}) додатковий F-тест підтверджує доцільність застосування двосторонніх фіксованих ефектів. Для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) включення часових ефектів не є обов'язковим. Фінальними специфікаціями моделі панельної регресії було обрано two-way FE для Eco_{it} та country FE для Sec_{it} .

Таблиця 1

**Статистики діагностичних тестів
та прийняте рішення щодо вибору специфікації моделі панельної регресії**

Назва діагностичного тесту	Статистика для рівняння економічних трансформацій (Eco)	Статистика для рівняння цифрової безпеки (Sec)	Прийняте рішення щодо вибору специфікації при $\alpha = 0,05$
F: pooled OLS vs FE	$F = 32,271; p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$F = 24,708; p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	Відхиляємо H_0 (для обох рівнянь)
LM Breusch-Pagan: pooled OLS vs RE	$\chi^2 = 831,69; p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\chi^2 = 618,82; p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	Відхиляємо H_0 (для обох рівнянь)
Hausman: RE vs FE	$\chi^2 = 14,709; p = 0,0006396$	$\chi^2 = 80,562; p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	Відхиляємо H_0 (для обох рівнянь)
F: one-way FE vs two-way FE	$F = 5,4703; p < 3,271 \cdot 10^{-9}$	$F = 1,0993; p = 0,3583$	Eco: відхиляємо H_0 Sec: не відхиляємо H_0

* Побудовано авторами за власними розрахунками

Робимо висновок, що специфікація pooled OLS є неприйнятною для жодного з рівнянь, оскільки F- та LM-тести статистично відхиляють відповідні нульові гіпотези. Тест Хаусмана для обох рівнянь відхиляє припущення про специфікацію RE на користь специфікації FE. Тому базою для параметризації обрана специфікація FE. Для рівняння економічних трансформацій (Eco_{it}) додатковий F-тест підтверджує доцільність застосування двосторонніх фіксованих ефектів. Для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) включення часових ефектів не є обов'язковим. Фінальними специфікаціями моделі панельної регресії було обрано two-way FE для Eco_{it} та country FE для Sec_{it} .

Після того як вибір фінальної специфікації моделі панельної регресії був зроблений та емпірично підтверджений, потрібно оцінити параметри цієї моделі – коефіцієнти при доменних індексах цифровізації суспільства та освіти. Вони дають можливість здійснити ґрунтовну інтерпретацію сили, пряму та статистичної надійності окреслених зв'язків.

В таблиці 2 подано результати параметризації FE-специфікацій моделей панельної регресії для економічного та безпекового результуючих доменів, враховуючи обидва варіанти робастної інференції – кластерно-робастну за країнами та Driscoll-Kraay.

Оцінюючи отримані результати, бачимо, що найбільш стійкий позитивний ефект в обох рівняннях отримано для домену цифровізації суспільства S_{it} : $\hat{\beta}_1 = 0,3878$ у рівнянні для Eco_{it} та $\hat{\gamma}_1 = 0,4251$ у рівнянні для Sec_{it} . Це означає, що приріст S_{it} на 0,1 пункти призводить в середньому до приросту Eco_{it} на 0,0388 та Sec_{it} на 0,0425 пункти за інших рівних умов. Дані оцінки формують основу для подальших перевірок стійкості, оскільки вони зберігають знак та статистичну значущість за альтернативних схем робастної інференції.

Таблиця 2

Оцінки параметрів FE-специфікацій моделей панельної регресії

Рівняння	Змінна	Коефіцієнт	SE (cluster)	t, p (cluster)	t, p (Driscoll-Kraay)
Eco_{it} (two-way FE)	S_{it}	0,3878	0,1178	t = 3,293 p = 0,000991	t = 4,286 p = $1,82 \cdot 10^{-5}$
Eco_{it} (two-way FE)	E_{it}	0,0982	0,1038	t = 0,947 p = 0,344	t = 2,469 p = 0,0136
Sec_{it} (country FE)	S_{it}	0,4251	0,0507	t = 8,381 p < 0,001	t = 39,011 p < 0,001
Sec_{it} (country FE)	E_{it}	0,1728	0,1366	t = 1,265 p = 0,206	t = 3,650 p = $2,62 \cdot 10^{-4}$

* Побудовано авторами за власними розрахунками

Для домену цифровізації освіти E_{it} ситуація є менш однозначною, оскільки коефіцієнти становлять: $\hat{\beta}_2 = 0,0982$ у рівнянні Eco_{it} та $\hat{\gamma}_2 = 0,1728$ у рівнянні Sec_{it} , а їхня статистична значущість дуже чутлива до вибору матриці коваріацій. Це може означати іншу часову природу каналу цифровізації освіти.

Його коректніше буде інтерпретувати не як миттєвий та стабільний ефект, а як вплив, що може бути повніше розкритий у динамічній постановці. Зважаючи на це, логічним та методично необхідним кроком є перехід до лагової та інтеракційної перевірок моделі.

Спочатку було перевірено можливий відкладений ефект каналу цифровізації освіти включенням лагу для домену цифровізації освіти, оскільки цифровізація освіти може бути пов'язаною із накопиченням компетентностей та людського капіталу, а значить її вплив проявляється не у короткій перспективі, а із часовим запізненням.

Лагова специфікація моделі панельної регресії для домену цифровізації освіти:

$$Y_{it} = \theta_0 + \theta_1 S_{it} + \theta_2 E_{it} + \theta_3 E_{i,t-1} + \mu_i + \lambda_t + u_{it}, \quad (6)$$

де: $Y_{it} \in \{Eco_{it}, Sec_{it}\}$;

$E_{i,t-1}$ – часовий лаг домену цифровізації освіти.

Параметризація показує, що коефіцієнт при $E_{i,t-1}$ є додатним і статистично значущим як для рівняння економічних трансформацій (Eco_{it}): $\hat{\theta}_3 = 0,1132$, $p = 0,00878$, так і для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}): $\hat{\theta}_3 = 0,1058$, $p = 0,0159$. У даній постановці канал цифровізації освіти набуває динамічного змісту.

На наступному кроці виконано перевірку ефекту взаємодії $S_{it} \times E_{it}$, щоб визначити потенційну взаємодію суспільної та освітньої цифровізації. Для цього була використана така специфікація моделі панельної регресії:

$$Y_{it} = \delta_0 + \delta_1 S_{it} + \delta_2 E_{it} + \delta_3 (S_{it} \times E_{it}) + \mu_i + \lambda_t + u_{it}. \quad (7)$$

Параметризація показує неоднорідний вплив ефекту взаємодії. У рівнянні економічних трансформацій (Eco_{it}) вплив взаємодії $S_{it} \times E_{it}$ має від'ємне значення: $\hat{\delta}_3 = -0,2282$, $p = 0,0087$, в той час як у рівнянні цифрової безпеки (Sec_{it}) вплив взаємодії $S_{it} \times E_{it}$ є позитивним: $\hat{\delta}_3 = 0,3595$, $p = 4,62 \cdot 10^{-5}$.

Таким чином ефект взаємодії доменів суспільної та освітньої цифровізації має контекстний характер і залежить від результативного домену.

Окремо для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) було перевірено альтернативу з часовими фіксованими ефектами.

Діагностичний F-тест one-way FE vs two-way FE для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) показує значення $F = 1,0993$ при $p = 0,3583$, що не відхиляє нульову гіпотезу про достатність країнових фіксованих ефектів.

Зміст і напрямок впливу ефекту взаємодії $S_{it} \times E_{it}$ не змінюються: коефіцієнт при доменному індексі цифровізації суспільства S_{it} зберігає додатний знак і статистичну значущість, тому базовою специфікацією моделі панельної регресії для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) залишається country FE, а часові ефекти можуть бути використані для додаткової перевірки чутливості.

Завершальним етапом була заміна кластерно-робастної матриці на Driscoll-Kraay для перевірки чутливості висновків до альтернативної робастної інференції. Для доменного індексу цифровізації суспільства S_{it} знак і статистична значущість зберігаються в обох рівняннях: $t = 4,286$ при $p = 1,82 \cdot 10^{-5}$ для рівняння економічних трансформацій (Eco_{it}) і $t = 39,011$ при $p < 0,001$ для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}).

Для індексу цифровізації освіти E_{it} значущість підвищилась: для рівняння економічних трансформацій (Eco_{it}) за Driscoll-Kraay маємо $t = 2,469$ при $p = 0,0136$, а для рівняння цифрової безпеки (Sec_{it}) маємо $t = 3,650$ при $p = 2,62 \cdot 10^{-4}$. Отже, ефект від діджиталізації суспільства є стійким, а освітній чутливіший до структури похибок.

Ключові результати перевірок стійкості наведені у таблиці 3.

Таблиця 3.

Результати перевірок стійкості

Назва перевірки	Ключові значення	Інтерпретація результату
Додавання лагу $E_{i,t-1}$	$E_{coit}: \hat{\theta}_3 = 0,1132$ ($p = 0,00878$) $Sec_{it}: \hat{\theta}_3 = 0,1058$ ($p = 0,0159$)	Лаговий канал цифровізації освіти є додатним і статистично значущим в обох рівняннях
Додавання ефекту взаємодії $S_{it} \times E_{it}$	$E_{coit}: \hat{\delta}_3 = -0,2282$ ($p = 0,0087$) $Sec_{it}: \hat{\delta}_3 = 0,3595$ ($p = 4,62 \cdot 10^{-5}$)	Ефект взаємодії залежить від результуючого домену
Альтернатива часовим ефектам Sec_{it}	$F = 1,0993$ ($p = 0,3583$)	Часові FE не є обов'язковими для базової специфікації Sec_{it}
Заміна матриці коваріацій (cluster $\rightarrow$ Driscoll-Kraay)	$E_{coit}: S_{it}: t = 4,286$ ($p = 1,82 \cdot 10^{-5}$) $E_{it}: t = 2,469$ ($p = 0,0136$) $Sec_{it}: S_{it}: t = 39,011$ ($p < 0,001$) $E_{it}: t = 3,650$ ($p = 2,62 \cdot 10^{-4}$)	Ефект S_{it} лишається стійким; значущість E_{it} зростає за альтернативної робастної інференції

* Побудовано авторами за власними розрахунками

Послідовні перевірки стійкості показали, що надійним короткостроковим впливом є ефект цифровізації суспільства, в той час як домен цифровізації освіти стає більш переконливим у динамічній постановці. За таких умов параметричний аналіз цифровізації не виконує формальне ранжування країн, а розрізняє канали за їх стійкістю, часовою природою та доменними специфікаціями.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У статті представлено та обґрунтовано відтворюване процедурне рішення для коректного оцінювання впливу цифровізації суспільства та освіти на економічні трансформації і безпеку. Отримані результати підтверджують, що як для рівняння економічних трансформацій, так і для рівняння цифрової безпеки, виправданою є FE-специфікація, причому для рівняння економічних трансформацій статистично необхідними є двосторонні фіксовані ефекти, а для рівняння цифрової безпеки базовою є країнова FE-постановка з додатковими перевітками чутливості до часових ефектів.

Науковий результат дослідження полягає в апробації протоколу вибору специфікації моделі панельної регресії для оцінювання впливу цифрової трансформації в міжкрайновій макроекономічній панелі базуючись на наборі послідовних діагностичних тестів (F, LM, Hausman, тест часових ефектів). Отримані оцінки показують, що впливи не є симетричними, а навпаки, змістовно диференційованими: цифровізація суспільства показує стійкий короткостроковий зв'язок із результуючими доменами, а освітня цифровізація демонструє слабший короткостроковий, проте статистично підтверджений лаговий канал впливу. Поєднання кластерно-робастної та Driscoll-Kraay інференції підвищує надійність прикладних результатів та допомагає уникати хибних інтерпретацій в тих постановках, де результати є чутливими до структури похибок.



Практична цінність дослідження полягає у можливості використовувати отриманий протокол як робочий стандарт для відтворюваного полісу-аналізу, тобто не тільки оцінювати міжкрайнові відмінності, а і оцінювати параметричну силу окремих каналів цифровізації з урахуванням їхньої відмінної часової природи. Для формування політико-економічних висновків це означає, що ефекти цифровізації суспільства можуть проявлятися безпосередньо, в той час як цифровізація освіти має бути врахована на довшому часовому горизонті планування. Проте дослідження також має відомі обмеження – потенційну ендогенність, чутливість оцінок каналу цифровізації освіти до короткого горизонту та ймовірність залишкової міжкрайнової залежності. Доцільним є спрямувати подальші дослідження на динамічні панельні моделі, просторові панельні специфікації та інструментальні змінні.

Фінансування. Автори не отримували фінансування для цього дослідження.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Декларація про використання ШІ. Під час підготовки рукопису автори частково використовували інструменти штучного інтелекту Google Gemini для редагування тексту. Усі результати, висновки та інтерпретації є виключно авторським внеском.

Список використаних джерел

1. OECD. *OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the Technology Frontier*. Paris : OECD Publishing, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en>
2. European Commission. The Digital Economy and Society Index (DESI). *Shaping Europe's Digital Future*. 2024. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi> (дата звернення: 01.04.2026).
3. Borowiecki M., Pareliussen J., Glocker D., Kim E. J., Polder M., Rud I. The Impact of Digitalisation on Productivity: Firm-Level Evidence from the Netherlands. *OECD Economics Department Working Papers*. 2021. No. 1680. Paris : OECD Publishing, 2021. 33 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/e800ee1d-en>
4. Mosiashvili N., Pareliussen J. Digital Technology Adoption, Productivity Gains in Adopting Firms and Sectoral Spill-Overs: Firm-Level Evidence from Estonia. *OECD Economics Department Working Papers*. 2020. No. 1638. Paris : OECD Publishing, 2020. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.1787/ba9d00be-en>
5. Copestake A., Estefania-Flores J., Furceri D. Digitalization and Resilience. *IMF Working Papers*. 2022. Vol. 2022, no. 210. 48 p. DOI: <https://doi.org/10.5089/9798400225697.001>
6. Mura P. O., Donath L. E. Digitalisation and Economic Growth in the European Union. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 7. Article 1718. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12071718>
7. Bocean C. G., Vărzaru A. A. EU Countries' Digital Transformation, Economic Performance, and Sustainability Analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2023. Vol. 10. Article 875. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02415-1>
8. Małkowska A., Urbaniec M., Kosala M. The Impact of Digital Transformation on European Countries: Insights from a Comparative Analysis. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*. 2021. Vol. 16, no. 2. P. 325–355. DOI: <https://doi.org/10.24136/eq.2021.012>
9. Wooldridge J. M. *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. 8th ed. Boston, MA : Cengage, 2025.
10. Baltagi B. H. *Econometric Analysis of Panel Data*. 6th ed. Cham : Springer, 2021. XX, 424 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53953-5>



11. Database. Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (дата звернення: 09.04.2026).
12. DataBank. The World Bank. URL: <https://databank.worldbank.org> (дата звернення: 09.04.2026).

References

1. OECD. (2024). *OECD digital economy outlook 2024 (Volume 1): Embracing the technology frontier*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en>
2. European Commission. (2024). *The Digital Economy and Society Index (DESI)*. Shaping Europe's Digital Future. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
3. Borowiecki, M., Pareliussen, J., Glocker, D., Kim, E. J., Polder, M., & Rud, I. (2021). *The impact of digitalisation on productivity: Firm-level evidence from the Netherlands* (OECD Economics Department Working Paper No. 1680). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/e800ee1d-en>
4. Mosiashvili, N., & Pareliussen, J. (2020). *Digital technology adoption, productivity gains in adopting firms and sectoral spill-overs: Firm-level evidence from Estonia* (OECD Economics Department Working Paper No. 1638). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/ba9d00be-en>
5. Copestake, A., Estefania-Flores, J., & Furceri, D. (2022). *Digitalization and resilience* (IMF Working Paper No. 2022/210). International Monetary Fund. <https://doi.org/10.5089/9798400225697.001>
6. Mura, P. O., & Donath, L. E. (2023). Digitalisation and economic growth in the European Union. *Electronics*, 12(7), Article 1718. <https://doi.org/10.3390/electronics12071718>
7. Bocean, C. G., & Vărzaru, A. A. (2023). EU countries' digital transformation, economic performance, and sustainability analysis. *Humanities and Social Sciences Communications*, 10, Article 875. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02415-1>
8. Małkowska, A., Urbaniec, M., & Kosała, M. (2021). The impact of digital transformation on European countries: Insights from a comparative analysis. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, 16(2), 325–355. <https://doi.org/10.24136/eq.2021.012>
9. Wooldridge, J. M. (2025). *Introductory econometrics: A modern approach* (8th ed.). Cengage.
10. Baltagi, B. H. (2021). *Econometric analysis of panel data* (6th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53953-5>
11. Eurostat. (n.d.). Database. <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
12. World Bank. (n.d.). DataBank. <https://databank.worldbank.org>

Отримано:	18.04.2026	Beérkezett:	2026.04.18	Received:	18.04.2026
Прийнято до друку:	13.07.2026	Elfogadva:	2026.07.13	Accepted:	13.07.2026
Опубліковано:	30.09.2026	Megjelent:	2026.09.30	Published:	30.09.2026